

BAB II

TINJAAAN PUSTAKA

2.1 Konsep Perencanaan

2.1.1 Bangunan Struktur Baja

Struktur baja adalah material yang banyak digunakan dalam bangunan industri khusus bangunan dengan fungsi sebagai *warehouse* dan kilang minyak. Struktur utama dari bangunan struktur baja terdiri dari atap, plat lantai, balok, dan kolom. Namun, diperlukan perencanaan yang optimal agar kemampuan dari bangunan tersebut dapat memenuhi standar keamanan dan kenyamanan yang telah ditentukan.

2.1.2 Sistem Struktur Baja Tahan Gempa

Indonesia merupakan negara yang termasuk dalam wilayah peta lingkaran api Pasifik, berarti risiko gempa akan sering terjadi dengan waktu yang tidak dapat diperhitungkan. Baja secara alami mempunyai rasio kuat perbandingan berat – volume yang tinggi, sehingga mampu menghasilkan bangunan yang relatif ringan. Ini merupakan salah satu faktor penting pada perencanaan bangunan tahan gempa.

Capacity design merupakan dasar dalam perencanaan struktur tahan gempa. Dengan cara tersebut struktur direncanakan sedemikian rupa sehingga bila terjadi kondisi *inelastic*, hanya terjadi pada tempat yang ditentukan, yang memang telah direncanakan. Kondisi *inelastic* yang terjadi juga terkontrol, sebagai tempat *dissipation energy*. Sedangkan bagian struktur lainnya tetap berperilaku elastis.

2.1.2.1 Sistem Portal

a. *Special Moment Frames*

Special moment frames adalah jenis rangka yang dirancang dapat bekerja secara *inelastic* penuh, melalui kelelahan balok pada rangka dan kelelahan pada ujung dasar kolom. Hal ini mengharuskan pada bagian yang terjadi sendi-plastis perlu dirancang secara khusus. Bisa dipakai untuk perencanaan struktur gedung tinggi yang masih memungkinkan dengan sistem rangka. Rangka harus memenuhi

strong column and weak beam agar tidak terjadi sendi plastis di kolom yang dapat menyebabkan *story mechanisms*.

b. *Intermediet Moment Frames*

Jenis rangka ini serupa dengan SMF, yakni mampu berperilaku *inelastic* tetapi terbatas. Cocok diaplikasikan pada struktur dengan gempa yang relatif sedang, misal bangunan bertingkat rendah.

c. *Ordinary Moment Frames*

Ordinary moment frames adalah tipe rangka yang direncanakan untuk bekerja secara elastis saja. Oleh sebab itu hanya bisa digunakan pada sistem struktur dengan beban gravitasi yang dominan, misal bangunan tidak bertingkat yang memiliki bentang panjang dan lebar.

2.1.2.2 Sistem Rangka Batang Silang

a. *Special Concentrically Braced Frames (SCBF)*

SCBF adalah struktur rangka baja yang paling umum dipakai untuk konstruksi tahan gempa di daerah gempa besar. Rangka yang menganut SCBF direncanakan secara khusus sehingga *bracing* bekerja sebagai elemen melalui aksi tekuk tekan atau leleh tarik batang diagonal saat terjadi gempa besar.

b. *Ordinary Concentrically Braced Frames (OCBF)*

Bekerja seperti sistem SCBF, yaitu mengandalkan perilaku *axial* pada elemen-elemen strukturalnya. Oleh karena itu sistem rangka ini cenderung kaku, sehingga dapat dianggap sebagai rangka tak bergoyang. Tapi, sistem ini akan bekerja dengan baik jika berperilaku elastik saat gempa besar, sehingga hanya cocok jika diterapkan pada struktur yang lebih dipengaruhi beban-beban rencana yang sudah pasti letak keberadaannya (beban mati) atau beban gravitasi.

c. *Eccentrically Braced Frames (EBF)*

Cara kerja rangka jenis EBF mirip dengan SCBF hanya saja elemen diharapkan bekerja secara *inelastic* memanfaatkan adanya leleh geser dan/atau leleh lentur.

2.1.2.3 Sistem Lainnya

a. *Special truss Moment Frames (STMF)*

Special truss moment frames adalah struktur rangka, bisa berbentuk rangka batang diagonal atau rangka *vierendeel* sebagai elemen horizontalnya. Elemen pada bagian horizontal akan didesain agar dapat berperilaku *inelastic* pada saat gempa besar. Kondisi inelastis itulah yang menyebabkan bagian tersebut akan bekerja sebagai sumbu.

b. *Buckling Restrained Braced Frames (BRBF)*

BRBF sejenis CBF tetapi *bracing*-nya berupa elemen khusus, yang mampu berperilaku *inelastic* baik terhadap tarik maupun tekan. Untuk mengantisipasi tekuk maka elemen khusus tersebut terdiri dari batang ter-cover suatu elemen penutup yang mencegah terjadinya tekuk, sehingga ketika ada gaya tekan cenderung hanya mengalami leleh saja.

c. *Special Plate Shear Walls (SPSW)*

Special plate shear walls adalah struktur rangka dengan dinding pengisi berupa plat baja yang berada di dalamnya, yang akan bekerja sebagai elemen dengan mekanisme leleh plat dan tekuk.

2.1.3 Sistem Struktur Komposit

Dibuatnya sistem-sistem baru adalah usaha untuk memaksimalkan material terhadap gaya-gaya yang bekerja agar penggunaannya lebih efisien. Jika hanya membahas tentang kemampuan material untuk menerima tegangan maka sebenarnya menggunakan baja saja tidak akan ada masalah, karena tegangan tarik atau tekan baja memiliki nilai kekuatan yang sama. Ini jelas berbanding terbalik dengan beton, di mana dalam perencanaannya kuat tarik yang dimiliki beton diabaikan, apalagi jika telah mengalami retak. Oleh sebab itu struktur beton diperlukan tulangan baja untuk menahan tegangan tarik. Dalam struktur beton bertulang telah terjadi kerja sama sebagai satu kesatuan antara beton dan baja, sehingga cara kerja seperti itu juga bisa disebut sebagai komposit. Tetapi secara umum istilah komposit sering digunakan untuk elemen struktur yang mekanismenya ditentukan oleh kerja sama beton (bertulang) dengan profil baja. Elemen struktur yang dimaksud dapat berupa balok ataupun kolom.

Sistem balok komposit paling cocok diterapkan pada balok yang mendukung lantai (yang terbuat dari beton bertulang), baik digunakan jembatan maupun pada gedung. Pada sistem balok – lantai, sedikit sulit untuk membedakan dari tampilan luar apakah sistemnya komposit atau non-komposit. Perbedaan hanya ditentukan oleh keberadaan *shear stud* atau *shear connector* yang tertanam dalam plat betonnya, yang menyebabkan kedua komponen struktur (profil baja dan lantai beton) berperilaku komposit. Komponen struktur komposit ini dapat menahan beban sekitar 33 hingga 50% lebih besar daripada beban yang dapat dipikul oleh balok baja saja tanpa adanya perilaku komposit (Setiawan, 2008). Struktur komposit bisa memberikan kemampuan struktur yang lebih baik dan efektif dalam meningkatkan *capacity design* dan *stiffness*. Keuntungan penggunaan struktur komposit adalah:

1. Dapat mengurangi berat profil baja yang digunakan
2. Tinggi profil baja yang digunakan dapat direduksi
3. Meningkatkan kekakuan plat lantai
4. Dapat menambah panjang bentang

2.2 Konsep Pembebanan

Dalam menjalankan fungsinya, setiap struktur akan menerima pengaruh dari luar yang perlu dipikul. Selain pengaruh dari luar, struktur yang terbuat dari material bermassa, juga akan menahan beratnya sendiri karena pengaruh gaya gravitasi Bumi. Berikut merupakan gambaran pembebanan yang dikenakan pada konstruksi gedung bertingkat berdasarkan peraturan terkait:

2.2.1 Beban Vertikal

Beban vertikal merupakan beban yang bekerja pada struktur dan lebih dominan diakibatkan oleh gaya gravitasi Bumi. Berikut merupakan beban vertikal yang bekerja pada struktur gedung:

2.2.1.1 Beban Hidup

Fungsi dari elemen struktur khususnya plat lantai, adalah untuk mendukung beban-beban hidup yang berupa berat dari orang-orang atau hunian, perabot, mesin-mesin, peralatan, dan tumpukan barang. Beban hidup adalah beban

yang bisa ada atau tidak ada pada struktur untuk suatu waktu tertentu. Meskipun bisa berpindah-pindah, beban hidup masih tetap dikatakan bekerja secara perlahan-lahan pada struktur. Perencanaan pembebanan untuk beban hidup disesuaikan dengan standar pembebanan tabel 4-1 SNI 1727:2013.

Tabel 2.1 Koefisien tekanan internal

Hunian atau penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)		
Sistem lantai akses		
Ruang kantor	50 (2,4)	2000 (8,9)
Ruang komputer	100 (4,79)	2000 (8,9)
Gudang persenjataan dan ruang latihan	150 (7,18) ^a	
Ruang pertemuan		
Kursi tetap (terikat di lantai)	100 (4,79) ^a	
Lobi	100 (4,79) ^a	
Kursi dapat dipindahkan	100 (4,79) ^a	
Panggung pertemuan	100 (4,79) ^a	
Lantai podium	150 (7,18) ^a	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi 100 psf (4,79 kN/m ²)	
Jalur untuk akses pemeliharaan	40 (1,92)	300 (1,33)
Koridor		
Lantai pertama	100 (4,79)	
Lantai lain	sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain	
Ruang makan dan restoran	100 (4,79) ^a	
Hunian (lihat rumah tinggal)		
Ruang mesin elevator (pada daerah 2 in. x 2 in. [50 mm x 50 mm])		300 (1,33)
Konstruksi pelat lantai <i>finishing</i> ringan (pada area 1 in. x 1 in. [25 mm x 25 mm])		200 (0,89)
Jalur penyelamatan terhadap kebakaran	100 (4,79)	
Hunian satu keluarga saja	40 (1,92)	

Tangga permanen	Lihat pasal 4.5	
Garasi/Parkir		
Mobil penumpang saja	40 (1,92) ^{a, b, c}	
Truk dan bus	_c	
Susunan tangga, rel pengaman dan batang pegangan	Lihat pasal 4.5	
Helipad	60	e, r, g
	(2,87) ^{de} tidak boleh direduksi	
Rumah sakit:		
Ruang operasi, laboratorium	60 (2,87)	1000 (4,45)
Ruang pasien	40 (1,92)	1000 (4,45)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	1000 (4,45)
Hotel (lihat rumah tinggal)		
Perpustakaan		
Ruang baca	60 (2,87)	1000 (4,45)
Ruang penyimpanan	150 (7,18) ^{a, h}	1000 (4,45)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	1000 (4,45)
Pabrik		
Ringan	125 (6,00) ^a	2000 (8,90)
Berat	250 (11,97) ^a	3000 (13,40)
Gedung perkantoran:		
Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian		
Lobi dan koridor lantai pertama	100 (4,79)	2000 (8,90)
Kantor	50 (2,40)	2000 (8,90)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	2000 (8,90)
Lembaga hukum		
Blok sel	40 (1,92)	
Koridor	100 (4,79)	
Tempat rekreasi		
Tempat bowling, kolam renang, penggunaan yang sama	75 (3,59) ^a	
Bangsai dansa dan ruang dansa	100 (4,79) ^a	
Gimnasium	100 (4,79) ^a	
Tempat menonton baik terbuka atau tertutup	100 (4,79) ^{a, k}	
Stadium dan tribun/arena dengan tempat duduk tetap (terikat pada lantai)	60 (2,87) ^{a, k}	
Rumah tinggal		
Hunian (satu keluarga dan dua keluarga)		
Loteng yang tidak dapat didiami tanpa gudang	10 (0,48) ^l	
Loteng yang tidak dapat didiami dengan gudang	20 (0,96) ^m	

Loteng yang dapat didiami dan ruang tidur	30 (1,44)	
Semua ruang kecuali tangga dan balkon	40 (1,92)	
Semua hunian rumah tinggal lainnya		
Ruang pribadi dan koridor yang melayani mereka	40 (1,92)	
Ruang publik ^a dan koridor yang melayani mereka	100 (4,79)	
Atap		
Atap datar, berbubung, dan lengkung	20 (0,96) ⁿ	
Atap digunakan untuk taman atap	100 (4,79)	
Atap yang digunakan untuk tujuan lain	Sama seperti hunian dilayani ^a	i
Atap yang digunakan untuk hunian lainnya		
Awning dan kanopi		
Konstruksi pabrik yang didukung oleh struktur rangka kau ringan	5 (0,24) tidak boleh direduksi	
Rangka tumpu layar penutup	5 (0,24) tidak boleh direduksi dan berdasarkan luas tributari dari atap yang ditumpu oleh rangka	200 (0,89)
Semua konstruksi lainnya	20 (0,96)	2000 (8,9)
Komponen struktur atap utama, yang terhubung langsung dengan pekerjaan lantai		
Titik panel tunggal dari batang bawah rangka atap atau setiap titik sepanjang komponen struktur utama yang mendukung atap di atas pabrik, gudang, dan perbaikan garasi		300 (1,33)
Semua komponen struktur atap utama lainnya		300 (1,33)
Semua permukaan atap dengan beban pekerja pemeliharaan		
Sekolah		
Ruang kelas	40 (1,92)	1000 (4,45)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	1000 (4,45)
Koridor lantai pertama	100 (4,79)	1000 (4,45)
Bak-bak/ <i>scuttles</i> , rusuk untuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses		200 (0,89)

Pinggir jalan untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk-truk	250 (11,97) ^a _p	8000 (35,6) ^q
Tangga dan jalan keluar	100 (4,79)	300 ^r
Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	40 (1,92)	300 ^r
Gudang di atas langit-langit	20 (0,96)	
Gudang penyimpanan barang sebelum disalurkan ke pengecer (jika diantisipasi menjadi gudang penyimpanan, harus dirancang untuk beban lebih berat)		
Ringan	125 (6,00) ^a	
Berat	250 (11,97) ^a	
Toko		
Eceran		
Lantai pertama	100 (4,79)	1000 (4,45)
Lantai di atasnya	75 (3,59)	1000 (4,45)
Grosir, di semua lantai	125 (6,00) ^a	1000 (4,45)
Penghalang kendaraan	Lihat Pasal 4.5	
Susunan jalan dan panggung yang ditinggikan (selai jalan keluar)	60 (2,87)	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	100 (4,79) ^a	

Sumber: SNI 1727:2013

2.2.1.2 Beban Mati

Beban mati yang diperhitungkan dalam struktur gedung ini adalah beban elemen struktur gedung yang memiliki fungsi struktural maupun non-struktural. Untuk menghitung besarnya beban mati suatu elemen dapat dilakukan dengan meninjau berat satuan material tersebut berdasarkan volume elemen. Berat satuan atau berat sendiri dari beberapa material konstruksi dan komponen bangunan gedung dapat ditentukan dari peraturan yang telah berlaku di Indonesia yaitu tabel 2.1 Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983.

Tabel 2.2 Berat sendiri bahan bangunan dan komponen gedung

BAHAN BANGUNAN	
Baja	7.850 kg/m ³
Batu alam	2.600 kg/m ³
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1.500 kg/m ³
Batu karang (berat tumpuk)	700 kg/m ³
Batu pecah	1.450 kg/m ³
Besi tuang	7.250 kg/m ³
Beton ⁽¹⁾	2.200 kg/m ³
Beton bertulang ⁽²⁾	2.400 kg/m ³
Kayu (Kelas I) ⁽³⁾	1.000 kg/m ³

Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1.650 kg/m ³
Pasangan bata merah	1.700 kg/m ³
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2.200 kg/m ³
Pasangan batu cetak	2.200 kg/m ³
Pasangan batu karang	1.450 kg/m ³
Pasir (kering udara sampai lembab)	1.600 kg/m ³
Pasir (jenuh air)	1.800 kg/m ³
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1.850 kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1.700 kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (basah)	2.000 kg/m ³
Timah hitam (timbel)	11.400 kg/m ³
Komponen Gedung	
Adukan, per cm tebal:	
- dari semen	21 kg/m ²
- dari kapur, semen merah atau tras	17 kg/m ²
Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14 kg/m ²
Dinding pasangan bata merah:	
- satu batu	450 kg/m ²
- setengah batu	250 kg/m ²
Dinding pasangan batako:	
Berlubang:	
- tebal dinding 20 cm (HB 20)	200 kg/m ²
- tebal dinding 10 cm (HB 10)	120 kg/m ²
Tanpa lubang:	
- tebal dinding 15 cm	300 kg/m ²
- tebal dinding 10 cm	200 kg/m ²
Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya, tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari:	
- semen asbes (eternit dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11 kg/m ²
- kaca, dengan tebal 3 - 4 mm	10 kg/m ²
Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban hidup maksimum 200 kg/m ²	40 kg/m ²
Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s. minimum 0,80 m	7 kg/m ²
Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	50 kg/m ²
Penutup atap sirap dengan reng dan usuk/kaso, per m ² bidang atap	40 kg/m ²
Penutup atap seng gelombang (BWG 24) tanpa gorden	10 kg/m ²

Penutup lantai dari ubin semen Portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	24 kg/m ²
Semen asbes gelombang (tebal 5 mm)	24 kg/m ²

Sumber: Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983

2.2.1.3 Beban Hujan

Setiap bagian dari suatu atap harus dirancang mampu menahan beban dari semua air hujan yang terkumpul apabila sistem drainase primer untuk bagian tersebut tertutup ditambah beban merata yang disebabkan oleh kenaikan air di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran rencananya. Menurut SNI 1727:2013 (8.3) pembebanan air hujan pada atap gedung dihitung sebagai berikut:

$$RL = 0,0098 \cdot (ds + dh) \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

R = beban air hujan pada atap yang tidak melendut (kN/m²).

ds = kedalaman air hujan pada atap yang tidak melendut meningkat ke lubang masuk sistem drainase sekunder apabila sistem drainase primer tertutup (mm).

dh = tambahan kedalaman air pada atap yang tidak melendut di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran air rencana (mm).

2.2.2 Beban Horizontal

2.2.2.1 Beban Angin

Parameter yang digunakan dalam penentuan beban angin yang bekerja pada gedung menurut SNI 1727:2013 adalah sebagai berikut:

a. Kecepatan Angin Dasar

Kecepatan angin dasar merupakan kecepatan angin rata-rata yang terjadi setiap periode pada suatu wilayah.

b. Kategori Eksposur (Kh)

Eksposur arah angin ditentukan pada kekasaran permukaan tanah yang ditentukan dari topografi alam, vegetasi dan fasilitas bangunan.

c. Koefisien Tekan Internal

Koefisien tekan internal dengan klasifikasi desain gedung yang tertutup penuh menurut tabel 26.11-1 SNI 1727-2013.

Tabel 2.3 Koefisien tekanan internal

Klasifikasi Ketertutupan	(GC_{pi})
Bangunan gedung terbuka	0,00
Bangunan gedung tertutup sebagian	+0,55 -0,55
Bangunan gedung tertutup	+0,18 -0,18

Sumber: SNI 1727:2013

d. Koefisien Tekan Dinding

Harga koefisien tekan akibat gaya angin pada dinding gedung menurut gambar 27.4-1 (lanjutan) SNI 1727:2013 adalah sebagai berikut:

Tabel 2.4 Koefisien tekan dinding

Koefisien tekanan dinding, C_p			
Permukaan	L/B	C_p	Digunakan dengan
Dinding di sisi angin datang	Seluruh nilai	0,8	q_z
Dinding di sisi angin pergi	0 – 1	-0,5	q_h
	2	-0,3	
	≥ 4	-0,2	
Dinding tepi	Seluruh nilai	-0,7	q_h

Sumber: SNI 1727:2013

2.2.2.2 Beban Gempa

a. Kategori Resiko Struktur Bangunan

Kategori resiko struktur bangunan sangat dipengaruhi oleh jenis pemanfaatan atau fungsi bangunan tersebut. Berdasarkan tabel 1 dan tabel 2 SNI 1726:2012 tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, seperti pada tabel berikut:

Tabel 2.5 Kategori risiko bangunan gedung dan non gedung untuk gempa

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:	
<ul style="list-style-type: none"> Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan Fasilitas sementara Gudang penyimpanan 	I

-
- Rumah jaga dan struktur kecil lainnya
-

Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:

- Perumahan
- Rumah toko dan rumah kantor
- Pasar
- Gedung perkantoran
- Gedung apartemen/rumah susun
- Pusat perbelanjaan/mall
- Bangunan industri
- Fasilitas manufaktur
- Pabrik

II

Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:

- Bioskop
- Gedung pertemuan
- Stadion
- Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat
- Fasilitas penitipan anak
- Penjara
- Bangunan untuk orang jompo

Gedung dan non gedung, tidak termasuk ke dalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:

III

- Pusat pembangkit listrik biasa
- Fasilitas penanganan air
- Fasilitas penanganan limbah
- Pusat telekomunikasi

Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.

Gedung dan non gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:

- Bangunan-bangunan monumental
- Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan

IV

- Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat
- Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat
- Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya
- Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya saat keadaan darurat
- Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat

Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.

Sumber: SNI 1726:2012

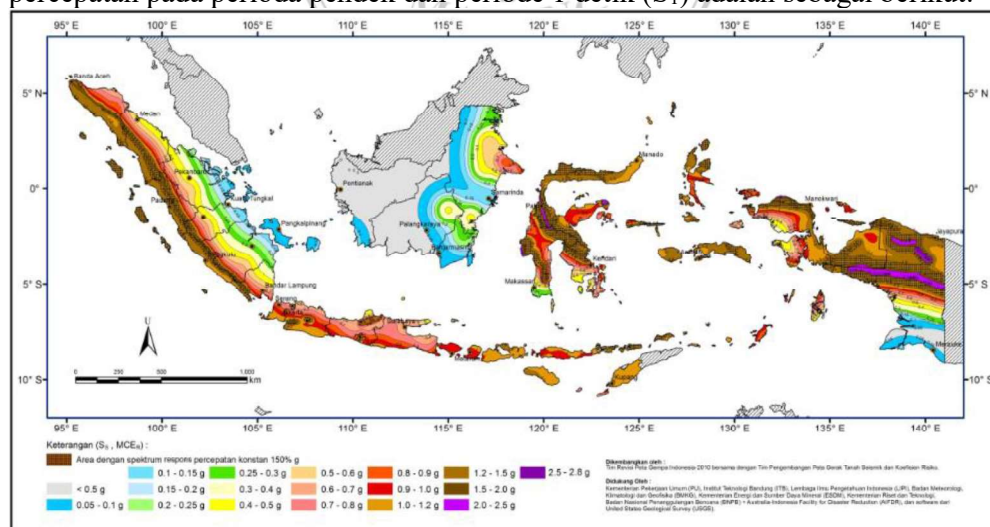
Tabel 2.6 Faktor keutamaan gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

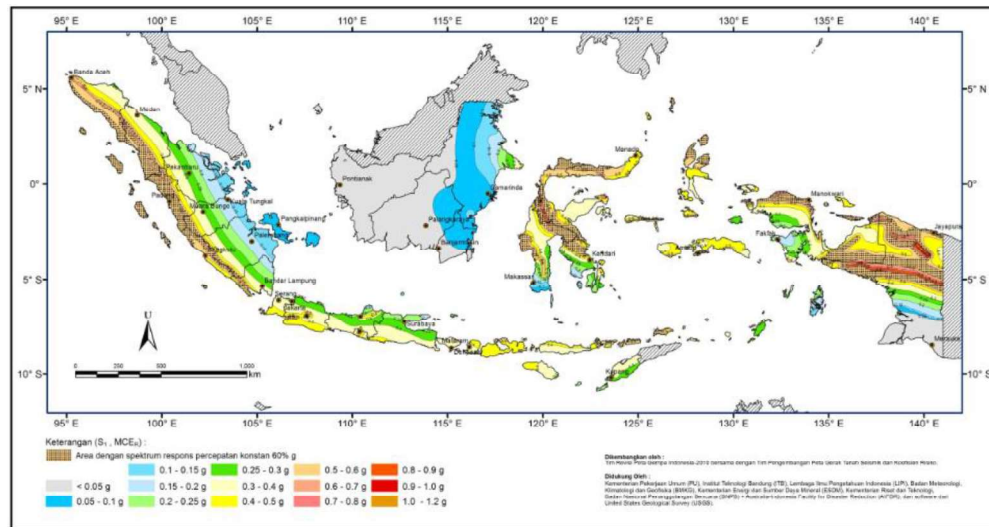
Sumber: SNI 1726:2012

b. Parameter Spektrum Respons

Berdasarkan gambar 9 – S_s dan gambar 10 – S_1 , peta gempa untuk S_s percepatan pada perioda pendek dan periode 1 detik (S_1) adalah sebagai berikut:



Gambar 2.1 S_s Gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R), kelas situs SB (Sumber: SNI 1726:2012)



Gambar 2.2 S_1 Gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R), kelas situs SB (Sumber: SNI 1726:2012)

c. Kelas Situs

Berdasarkan sifat-sifat tanah pada situs, maka tanah tersebut harus diklasifikasikan sebagai kelas situs S_A , S_B , S_C , S_D , S_E atau S_F . Bila sifat-sifat tanah tidak teridentifikasi secara jelas sehingga tidak bisa ditentukan kelas situs-nya, maka kelas situs S_E dapat digunakan kecuali jika pemerintah/dinas yang berwenang memiliki data geoteknik yang dapat menentukan kelas situs S_F . Berdasarkan tabel 3 SNI 1726:2012, klasifikasi situs adalah sebagai berikut:

Tabel 2.7 Klasifikasi situs

Kelas situs	vs (m/detik)	N atau Noh	su (kPa)
S_A (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
S_B (batuan)	705 sampai 1500	N/A	N/A
S_C (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	100
S_D (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
S_E (tanah lunak)	<175	<15	<50

Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut:

1. Indeks plastisitas, $PI > 20$,
2. Kadar air, $w > 40\%$,
3. Kuat geser nirair $su < 25$ kPa

SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 6.10.1)

Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:

- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah
- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)
- Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan Indeks Plastisitas $PI > 75$)

Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $su < 50$ kPa

Sumber: SNI 1726:2012

d. Kategori Desain Seismik

Struktur harus ditetapkan memiliki suatu kategori desain seismik yang mengikuti pasal 6.5 SNI 1726:2012. Masing-masing bangunan dan struktur harus ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih parah, dengan mengacu pada tabel 6 atau 7 SNI 1726:2012, terlepas dari nilai perioda fundamental getaran struktur, T .

Tabel 2.8 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respon percepatan pada periode pendek (S_{DS})

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber: tabel 6 SNI 1726:2012

Tabel 2.9 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respon percepatan pada periode 1 detik (S_{D1})

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,167$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber: tabel 7 SNI 1726:2012

Tabel 2.10 Koefisien situs, F_a

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa (MCER) terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SSb				

CATATAN:

- Untuk nilai-nilai antara S_s dapat dilakukan interpolasi linier
- SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 6.10.1

Sumber: tabel 4 SNI 1726:2012

Tabel 2.11 Koefisien situs, F_v

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa (MCER) terpetakan pada perioda 1 detik, S_1				
	$S_1 \leq 0,25$	$S_1 = 0,5$	$S_1 = 0,75$	$S_1 = 1,0$	$S_1 \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5

<i>SE</i>	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
<i>SF</i>	<i>SSb</i>				

CATATAN:

- Untuk nilai-nilai antara Ssdapat dilakukan interpolasi linier
- SS* = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 6.10.1

Sumber: tabel 5 SNI 1726:2012

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek, *SDS* dan pada periode 1 detik, *SD1* harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan:

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \dots\dots\dots (2.4)$$

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1 \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan:

S_s dan *S₁* didapat dari peta gempa

F_a dan *F_v* didapat dari koefisien situs

e. Gaya Geser Dasar Akibat Gempa

Besarnya gaya geser dapat ditentukan berdasarkan persamaan:

$$V = C_s \cdot W \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan:

C_s = koefisien respon gempa

W = berat bangunan

f. Koefisien Respon Gempa

Koefisien respon gempa ditentukan dengan persamaan:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter percepatan spectrum desain

R = faktor modifikasi respon

I_e = faktor keutamaan gempa

g. Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Gaya lateral gempa (F_x) (kN) yang timbul di semua tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$F_x = C_{vx} \cdot V \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan

$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum W_i h_i^k} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan:

C_{vx} = faktor distribusi vertikal

V = gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur

w_i = bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau

w_x dikenakan pada tingkat i atau x yang ditinjau

h_i = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x yang ditinjau

h_x

k = eksponen yang terkait dengan perioda struktur berikut:

$T \leq 0,5$ detik, maka $k = 1$; $T \geq 2,5$ detik, maka $k = 2$

Jika T antara $0,5 - 2,5$ detik, maka harus dilakukan interpolasi linier

2.2.3 Kombinasi Pembebanan

Berdasarkan peraturan yang berlaku pada pasal 2.3.2 SNI 1727:2013 tentang Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain, harus dirancang sedemikian rupa agar kekuatan desain strukturnya sama atau melebihi efek dari beban terfaktor dalam kombinasi berikut:

1. $1,4D$
2. $1,2D + 1,6L + 0,5 (L_r \text{ atau } S \text{ atau } R)$
3. $1,2D + 1,6 (L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
4. $1,2D + 1,0W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } S \text{ atau } R)$
5. $1,2D + 1,0E + L + 0,2S$
6. $0,9D + 1,0W$
7. $0,9D + 1,0E$

Keterangan:

- D = beban mati
- L = beban hidup
- L_r = beban hidup atap
- R = beban hujan
- W = beban angin
- E = beban gempa

2.3 Perencanaan Struktur

2.3.1 Metode LRFD (Load Resistance Factor Design)

LRFD adalah metode perencanaan struktur baja yang mendasarkan perencanaan dengan melakukan perbandingan kekuatan struktur yang telah diberi suatu faktor tahanan dengan kombinasi beban terfaktor yang harus dipikul pada struktur tersebut.

a. Kondisi Batas

Kondisi batas adalah suatu kondisi yang menunjukkan batas kemampuan suatu struktur agar bisa digunakan. Kriteria perencanaan memastikan bahwa kondisi batas harus kecil kemungkinan terlampaui, caranya dengan memilih kombinasi gaya, faktor tahanan dan nilai ketahanan yang tidak akan melampaui batas kemampuan suatu struktur berdasarkan kriteria perencanaan yang ada. Ada dua jenis kondisi batas yang diterapkan pada struktur, yaitu:

1. Kondisi batas kekuatan (*ultimate strength*), yang menetapkan besarnya keamanan terhadap kondisi beban ekstrim selama masa pakai struktur.
2. Kondisi batas layan yang menetapkan batasan-batasan agar struktur dapat berfungsi sesuai yang direncanakan.

Secara umum, suatu struktur dikatakan aman apabila memenuhi persyaratan sebagai berikut:

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i \cdot Q_i \dots\dots\dots (2.10)$$

bagian kiri dari persamaan di atas mewakili tahanan atau kekuatan dari sebuah komponen atau sistem struktur, sedangkan sisi kanan dari persamaan di atas menyatakan beban yang harus dipikul struktur tersebut. Jika tahanan R_n dikalikan

suatu faktor tahanan ϕ maka akan didapatkan nilai tahanan rencana. Namun demikian juga pada bagian kanan persamaan di atas, berbagai macam beban (beban mati, beban hidup, beban angin, beban gempa, dan lain-lain) dikalikan suatu faktor γ_i beban untuk mendapatkan jumlah beban terfaktor $\Sigma \gamma_i \cdot Q_i$.

Keterangan:

Σ = jumlah total

i = kondisi yang ditinjau

Q_i = pengaruh beban nominal

γ_i = faktor beban Q_i yang ditinjau

$\gamma_i Q_i$ = kuat perlu, dalam batas paling ekstrim

R_n = kuat nominal

ϕ = faktor tahanan

ϕR_n = kuat rencana

b. Ketentuan LRFD

Perencanaan LRFD dianggap memenuhi syarat jika kuat perlu, R_u lebih kecil dari kuat rencana, ϕR_n dengan ϕ adalah faktor tahanan yang nilainya bervariasi tergantung perilaku aksi komponen yang ditinjau. Konsep dasar ketentuan LRFD adalah:

$$R_u \leq \phi R_n \dots\dots\dots (2.11)$$

Kuat perlu, R_u adalah nilai maksimum dari berbagai kombinasi beban terfaktor yang dicari dengan bantuan analisis struktur. Untuk mencari kuat perlu, R_u untuk tiap-tiap elemen struktur, maka diperlukan analisa struktur secara menyeluruh (global). Faktor kombinasi beban disiapkan untuk analisis struktur cara elastis. Jika alat analisis struktur dilengkapi opsi memperhitungkan efek P- Δ (nonlinier geometri), maka ketentuan analisis stabilitas struktur selain memakai *Effective Length Method* (ELM) juga dapat memakai *Direct Analysis Method* (DAM).

Hasil analisis struktur secara menyeluruh (global) untuk R_u selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi elemen-per-elemen dan dibandingkan dengan kuat rencana, ϕR_n yang ditinjau per-elemen juga, sesuai dengan gaya internal yang terjadi. Tinjauan per-elemen diperlukan karena karakter untuk setiap aksi dan perilaku keruntuhannya bisa berbeda-beda.

Tabel 2.12 Faktor tahanan, ϕ

Tahanan rencana untuk	Faktor Tahanan
Komponen struktur yang memikul lentur:	
• balok	0,90
• balok pelat berdinding penuh	0,90
• pelat badan yang memikul geser	0,90
• pelat badan pada tumpuan	0,90
• pengaku	0,90
Komponen struktur yang memikul gaya tekan aksial:	
• ketahanan penampang	0,90
• ketahanan komponen struktur	0,90
Komponen struktur yang memikul gaya tarik aksial:	
• terhadap tahanan tarik leleh	0,90
• terhadap tahanan tarik fraktur	0,75
Komponen struktur yang memikul aksi-aksi kombinasi:	
• tahanan lentur atau geser	0,90
• tahanan tarik	0,90
• tahanan tekan	0,90
Sambungan baut:	
• baut yang memikul geser	0,75
• baut yang memikul tarik	0,75
• baut yang memikul kombinasi geser dan tarik	0,75
• lapis yang memikul tumpu	0,75
Sambungan las:	
• las tumpul penetrasi penuh	0,90
• las sudut dan las tumpul penetrasi sebagian	0,75
• las pengisi	0,75

Sumber: SNI 1729:2015

2.3.2 Perancangan Stabilitas

Perancangan stabilitas struktur adalah kombinasi analisis untuk menentukan kuat perlu penampang dan mendesain agar punya kekuatan dan kekakuan yang mencukupi. Cara untuk menghitung stabilitas struktur dibagi menjadi 3, yaitu:

1. Metode analisis langsung (*direct analysis method*)
2. Metode panjang efektif (*effective length method*)
3. Metode analisis orde pertama

Cara *Direct Analysis Method* (DAM) dibuat untuk mengatasi keterbatasan *Effective Length Method* (ELM) yang merupakan strategi penyederhanaan analisis cara manual. Pada cara DAM, pengaruh orde ke-2 ($P-\Delta$ & $P-\delta$) perlu diperhitungkan dalam mencari gaya-gaya internal batang. $P-\Delta$ adalah pengaruh pembebanan akibat terjadinya perpindahan titik-titik nodal elemen, sedangkan $P-\delta$ adalah pengaruh pembebanan akibat deformasi di elemen.

Perhitungan stabilitas struktur modern didasarkan anggapan bahwa perhitungan gaya-gaya batang diperoleh dari analisa elastis orde-2, yang memenuhi kondisi keseimbangan setelah diberikan pembebanan, yaitu setelah adanya deformasi. Imperfeksi dari elemen struktur seperti ketidaklurusan batang akibat proses fabrikasi atau konsekuensi adanya toleransi pelaksanaan lapangan, akan menghasilkan apa yang disebut efek ketidakseimbangan (*destabilizing*).

Adanya imperfeksi bawaan yang mengakibatkan efek *destabilizing* dalam *Direct Analysis Method* (DAM) dapat diselesaikan dengan dua cara, yaitu (1) cara pemodelan langsung pada geometri model yang dianalisis, atau (2) memberikan beban lateral ekuivalen.

Efek imperfeksi awal pada stabilitas struktur diperhitungkan melalui pemberian beban imajinatif (notional load) sebagai representasi dari imperfeksi tersebut. Distribusi beban disalurkan sebagai beban lateral pada semua tingkat, sebagai tambahan dari beban lateral yang ada dan ditambahkan pada semua kombinasi pembebanan. Beban lateral ekuivalen harus digunakan pada arah yang memberi efek *destabilizing* terbesar. Besarnya beban lateral ekuivalen dapat dihitung sebagai berikut:

$$N_i = 0,002 Y_i \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana:

N_i = beban lateral ekuivalen di level i

Y_i = beban gravitasi di level i hasil beban kombinasi LRFD

2.3.3 Dasar Perencanaan Struktur Balok Komposit

Seiring berkembangnya metode pengelasan yang baik serta ditemukannya alat-alat penghubung geser yang menahan gaya geser horizontal, maka penyambungan antara pelat beton dengan balok baja dapat ditingkatkan. Sehingga

kedua material ini (beton dan baja) akan menjadi satu kesatuan yang disebut dengan komponen struktur komposit.

Perilaku komposit hanya akan terjadi jika kemungkinan terjadinya pergeseran (*skid*) antara kedua material ini dapat dicegah. Tipe-tipe penghubung geser yang sering digunakan dapat berupa stud, baja tulangan spiral, atau profil kanal kecil yang pendek. Penghubung geser ini selanjutnya dihubungkan dengan flens atau balok agar dapat berfungsi komposit secara penuh.

Pada sistem pelat lantai komposit, umumnya arah gelombang (*rib*) diletakkan tegak lurus terhadap balok lantai dan sejajar dengan arah balok induk.

2.3.3.1 Sistem Pelaksanaan Komponen Struktur Komposit

Metode pelaksanaan suatu komponen struktur komposit (khususnya untuk komponen struktur lentur), secara umum dapat dibedakan berdasarkan ada atau tidaknya tumpuan sementara (*perancah*).

Jika tumpuan sementara tidak digunakan (*unshored*) maka profil baja akan berperilaku sebagai penumpu dari bekisting pelat beton, selama beton belum mengeras. Dalam tahap ini, balok baja harus mampu menahan beban-beban yang meliputi berat sendiri, berat bekisting plat serta berat beton yang masih belum mengeras. Setelah pelat beton mengeras maka aksi komposit akan mulai bekerja, sehingga semua beban layan yang ada meliputi beban mati dan hidup akan dipikul oleh komponen struktur komposit.

Sistem pelaksanaan yang lain adalah dengan menggunakan tumpuan sementara (*shored*) selama pelat beton belum mengeras. Tumpuan sementara ini akan memikul berat dari profil baja, bekisting plat serta beton yang belum mengeras. Dengan digunakannya tumpuan sementara akan dapat mengurangi tegangan yang timbul pada profil baja selama proses konstruksi. Setelah beton mengeras, perancah dilepas dan beban-beban layan dipikul melalui aksi komposit baja dengan plat beton.

2.3.3.2 Dek Baja Gelombang

Perkembangan struktur komposit dimulai dengan digunakannya dek baja gelombang, selain berfungsi sebagai bekisting saat pelat beton dicetak, juga berfungsi sebagai tulangan positif bagi pelat beton. Penggunaan dek baja juga dapat

dipertimbangkan sebagai dukungan dalam arah lateral dari balok sebelum beton mulai mengeras. Arah dari gelombang dek baja biasanya diletakkan tegak lurus dengan balok penopangnya.

Persyaratan dek baja gelombang dan penghubung gesernya untuk digunakan dalam komponen struktur komposit diatur dalam pasal I3.2c SNI 1729:2015. Dalam pasal ini diisyaratkan:

1. Tinggi maksimum dek baja, $h_r \leq 75$ mm, lebar rata-rata minimum dari dek gelombang, $w_r > 50$ mm tetapi tidak boleh diambil dalam perhitungan sebagai lebih dari lebar bersih minimum di dekat bagian paling atas dari dek baja
2. Pelat beton harus disambungkan ke balok baja dengan angkur *steel headed stud* di las baik pada dek atau penampang melintang baja. Diameter stud maksimum 19 mm
3. Tebal pelat di atas dek baja tidak boleh kurang dari 50 mm
4. Dek baja harus diangkurkan ke semua komponen struktur pendukung pada spasi tidak lebih dari 460 mm

Dalam perencanaan tulangan atap yang menggunakan *floor deck*, tulangan positif digantikan peranannya dengan *floor deck*. Besarnya nilai momen kapasitas *floor deck* dapat dihitung dengan rumus:

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d_{eff} - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (2.13)$$

dengan

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c \cdot b}$$

Dalam perencanaan tulangan lapis atas terlebih dahulu perlu ditentukan rasio tulangan maksimum dan minimum.

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f_c'}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \dots \dots \dots (2.14)$$

dengan

$$\rho_{maks} = 0,75 \cdot \rho_b$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$$

Nilai A_s pakai dari tabel A-5 Struktur Beton Bertulang Istimawan Dipohusodo didapat dari

$$A_s \text{ perlu} = \rho \times b \times d \dots\dots\dots (2.15)$$

dengan

$$\rho = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot Rn}{0,85 \cdot f'_c}} \right]$$

$$Rn = \frac{Mu}{\phi \cdot b \cdot d^2}$$

Tabel 2.13 Luas penampang tulangan baja per meter panjang pelat

Diameter batang (mm)	Luas Penampang (mm ²)								
	Jarak Spasi p.k.p (mm)								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
6	565,5	282,7	188,5	141,4	113,1	94,2	80,8	70,7	62,8
8	1005,3	502,7	335,1	251,3	201,1	167,6	143,6	125,7	111,7
9	1272,3	636,2	424,1	318,1	254,5	212,1	181,8	159,0	141,4
10	1570,8	785,4	523,6	392,7	314,2	261,8	224,4	196,3	174,5
12	2261,9	1131,0	754,0	565,5	452,4	377,0	323,1	282,7	251,3
13	2654,6	1327,3	884,9	663,7	530,9	442,4	379,2	331,8	295,0
14	3078,8	1539,4	1026,3	769,7	615,8	513,1	439,8	384,8	342,1
16	4021,2	2010,6	1340,4	1005,3	804,2	670,2	574,5	502,7	446,8
18	5089,4	2544,7	1696,5	1272,3	1017,9	848,2	727,1	636,2	565,5
19	5670,6	2835,3	1890,2	1417,6	1134,1	945,1	810,1	708,8	630,1
20	6283,2	3141,6	2094,4	1570,8	1256,6	1047,2	897,6	785,4	698,1
22		3801,3	2534,2	1900,7	1520,5	1267,1	1086,1	950,3	844,7
25		4908,7	3272,5	2454,4	1963,5	1636,2	1402,5	1227,2	1090,8
28		6157,5	4105,0	3078,8	2463,0	2052,5	1759,3	1539,4	1368,3
29		6605,2	4403,5	3302,6	2642,1	2201,7	1887,2	1651,3	1467,8
32		8042,5	5361,7	4021,2	3217,0	2680,8	2297,9	2010,6	1787,2
36			6785,8	5089,4	4071,5	3392,9	2908,2	2544,7	2261,9
40			8377,6	6283,2	5026,5	4188,8	3590,4	3141,6	2792,5
50			13090,0	9817,5	7854,0	6545,0	5610,0	4908,7	4363,3

Sumber: Struktur beton bertulang Istimawan Dipohusodo

Kontrol lendutan diambil pada pelat yang mempunyai bentang dan nilai momen yang terbesar tetapi sebelum melakukan kontrol lendutan dilakukan pemeriksaan tinggi minimum sesuai dengan tabel 9.5 (a) SNI 2847:2013.

Tabel 2.14 Tebal minimum balok non-prategang atau pelat satu arah bila lendutan tidak dihitung

Komponen struktur	Tebal minimum, h			
	Tertumpu sederhana	Satu ujung menerus	Kedua ujung menerus	Kantilever
	Komponen struktur tidak menumpu atau tidak dihubungkan dengan partisi atau konstruksi lainnya yang mungkin rusak oleh lendutan yang besar			
Pelat masif satu-arah	$l/20$	$l/24$	$l/28$	$l/10$
Balok atau pelat rusuk satu-arah	$l/16$	$l/18,5$	$l/21$	$l/8$

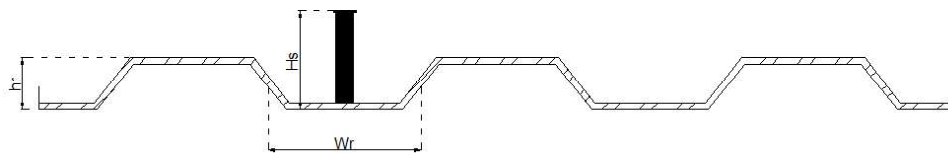
Sumber: SNI 2847:2013

Lendutan yang dihitung berdasarkan tabel di atas tidak boleh melebihi batasan berikut

Tabel 2.15 Lendutan izin maksimum yang dihitung

Jenis komponen struktur	Lendutan yang diperhitungkan	Batas Lendutan
Atap datar yang tidak menumpu atau tidak disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat beban hidup L	$l/180^*$
Lantai yang tidak menumpu atau tidak disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat beban hidup L	$l/360$
Jenis komponen struktur	Lendutan yang diperhitungkan	Batas Lendutan
Konstruksi atap atau lantai yang menumpu atau disatukan dengan komponen nonstruktural atau mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan komponen nonstruktural (jumlah dari lendutan jangka panjang, akibat semua beban tetap yang bekerja, dan lendutan seketika, akibat penambahan beban hidup)	$l/480$
Konstruksi atap atau lantai yang menumpu atau disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin tidak akan rusak oleh lendutan yang besar		$l/240$

Sumber: SNI 2847:2013



Gambar 2.3 Penampang melintang dek baja gelombang

Jika gelombang pada dek baja dipasang tegak lurus terhadap balok penopangnya, maka kuat nominal penghubung geser jenis paku harus direduksi dengan suatu faktor, r_s yang besarnya ditetapkan sebagai berikut:

$$r_s = \frac{0,85}{\sqrt{N_r}} \left(\frac{w_r}{h_r} \right) \left[\left(\frac{H_s}{h_r} \right) - 1,0 \right] \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.16)$$

keterangan:

r_s = faktor reduksi

N_r = jumlah penghubung geser jenis paku pada setiap gelombang pada potongan melintang balok baja

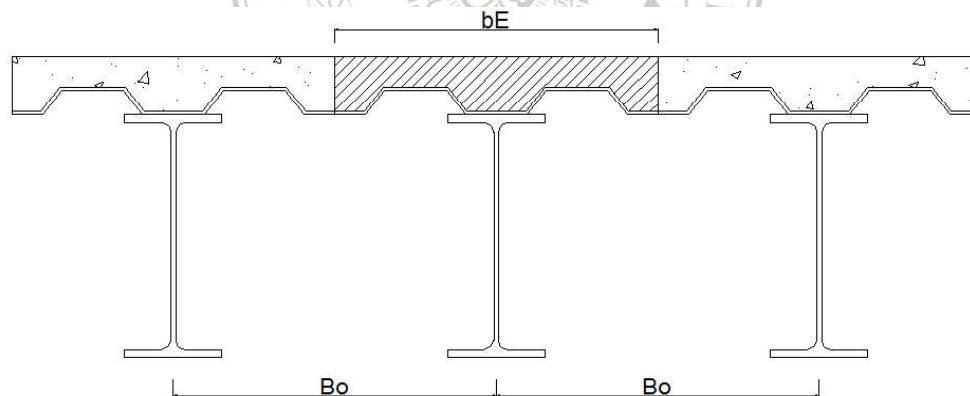
H_s = tinggi penghubung geser jenis paku $\leq (h_r + 75 \text{ mm})$

h_r = tinggi nominal gelombang dek baja

w_r = lebar efektif gelombang dek baja

2.3.3.3 Lebar Efektif Balok Komposit

Konsep lebar efektif sangat berguna dalam proses desain, terutama ketika proses desain harus dilakukan terhadap suatu elemen yang mengalami distribusi tegangan yang tidak seragam. Besarnya lebar efektif dari suatu komponen struktur komposit dapat ditentukan sebagai berikut:



Gambar 2.4 Lebar efektif balok komposit

Sesuai dengan pasal I3.1a SNI 1729:2015, menyatakan bahwa lebar efektif pelat beton harus diambil dari jumlah lebar efektif untuk setiap sisi sumbu balok, masing-masing yang tidak melebihi:

1. Seperdelapan dari bentang balok, pusat-ke-pusat tumpuan
2. Setengah jarak ke sumbu dari balok yang berdekatan
3. Jarak ke tepi dari pelat

$$b_E \leq \frac{L}{4} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$b_E = b_O \dots\dots\dots (2.18)$$

2.3.3.4 Balok Komposit dengan Angkur Kanal Baja

a. Kuat Lentur Nominal

Menurut pasal I3.2a SNI 1729:2015 ditentukan sebagai berikut:

Kekuatan lentur nominal desain, $\phi_b M_n$ dari suatu komponen struktur komposit (untuk momen positif), dan kekuatan lentur positif yang diizinkan, M_n harus ditentukan untuk keadaan batas leleh sebagai berikut:

$$1. \text{ Untuk } \frac{h}{tw} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

M_n harus ditentukan dari distribusi tegangan plastis pada penampang komposit untuk keadaan batas leleh (momen plastis). $\phi_b = 0,90$.

$$2. \text{ Untuk } \frac{h}{tw} \geq 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

M_n harus ditentukan dari superposisi tegangan elastis, dengan memperhitungkan efek penopangan, untuk keadaan batas leleh (momen leleh). $\phi_b = 0,90$.

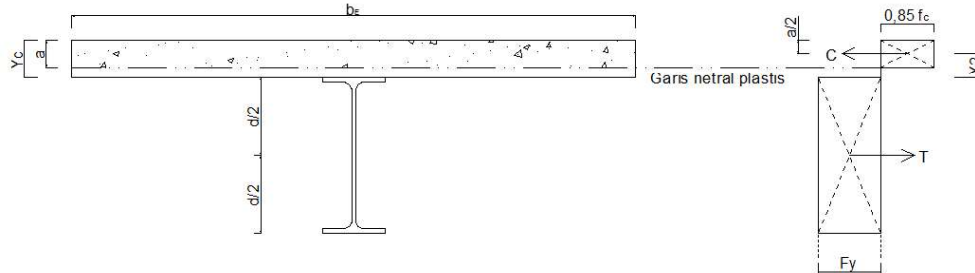
Untuk menghitung momen plastis balok komposit dicari posisi sumbu netral plastis, yang tergantung proporsi C dan T. Dengan nilai resultan gaya tekan dan tarik sebagai berikut:

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot A_c \dots\dots\dots (2.19)$$

$$T = F_y \cdot A_s \dots\dots\dots (2.20)$$

Ada tiga kondisi distribusi tegangan plastis mungkin terjadi, yaitu:

1. Jika $T \leq C$ sumbu netral plastis didalam pelat beton



Gambar 2.5 Distribusi tegangan plastis kondisi a

Volume pelat betonnya relatif besar, sehingga ketika terjadi momen lentur positif profil baja mengalami leleh terlebih dahulu. Tinggi blok tegangan tekan pada pelat beton (a) dapat dihitung sebagai berikut:

$$a = \frac{A_s \cdot F_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_E} \quad (2.21)$$

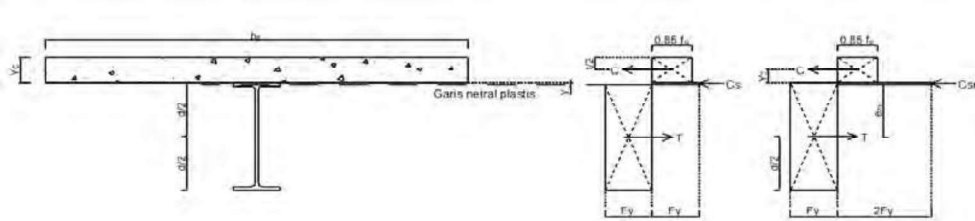
Asumsi benar jika $a < t_c$ jika pakai dek baja, atau $a < t$ pelat beton solid.

$$Y_c = h_r + t_c \quad (2.22)$$

$$Y_2 = Y_c - \frac{1}{2} a \quad (2.23)$$

$$M_n = M_p = F_y \cdot A_s \cdot (Y_2 + \frac{1}{2} d) \quad (2.24)$$

2. Jika $T > C$ sumbu netral plastis di baja (pelat sayap)



Gambar 2.6 Distribusi tegangan plastis kondisi b

Kondisi ini terjadi jika luasan pelat beton relatif lebih kecil dibanding kopel tarik profil baja. Oleh sebab itu ketika terjadi momen positif maka profil baja juga masih mengalami desak. Itu terjadi jika $t_f > y > 0$ yang dihitung dengan rumusan berikut:

$$T = F_y \cdot A_s \quad (2.25)$$

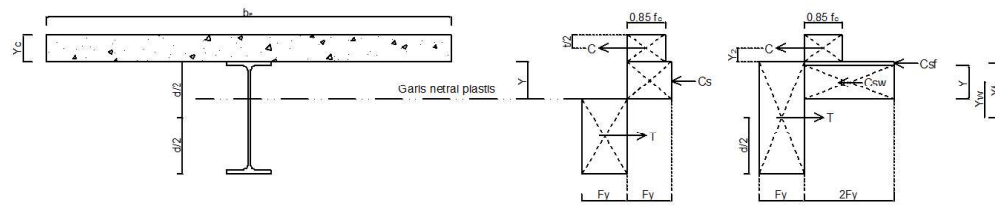
$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_E \cdot t_c \quad (2.26)$$

$$y = \frac{T - C}{b_f \cdot F_y} \leq t_f \quad (2.27)$$

$$C_{sm} = 2 F_y \cdot y \quad (2.28)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + \frac{1}{2} d) + C_{sm} (d - y) \frac{1}{2} \dots\dots\dots (2.29)$$

3. Jika $T > C$ sumbu netral plastis di baja (pelat badan)



Gambar 2.7 Distribusi tegangan plastis kondisi c

Jika $y > tf$ maka kondisi ini yang mungkin terjadi. Luas pelat beton relatif lebih kecil dibanding luas profil baja. Untuk keseimbangan gaya, akibatnya bagian pelat badan dari profil baja juga masih mengalami tekan. Kondisi ini dapat terjadi jika $T - C - C_{sf} > 0$. Adapun nilai-nilainya dihitung sebagai berikut:

$$T = F_y \cdot A_s \dots\dots\dots (2.30)$$

$$C = 0,85 \cdot f_c' \cdot b_E \cdot t_c \dots\dots\dots (2.31)$$

$$C_{sf} = b_f \cdot t_f \cdot 2F_y \dots\dots\dots (2.32)$$

$$y = \frac{T - C - C_{sf}}{t_w \cdot F_y} \leq t_f \dots\dots\dots (2.33)$$

$$C_{sw} = 2 F_y \cdot y \cdot t_w \dots\dots\dots (2.34)$$

$$y_f = \frac{1}{2} \cdot (d - t_f) \dots\dots\dots (2.35)$$

$$y_w = \frac{1}{2} \cdot (d + y) - t_f \dots\dots\dots (2.36)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + \frac{1}{2} d) + C_{sf} \cdot y_f + C_{sw} \cdot y_w \dots\dots\dots (2.37)$$

b. Penghubung Geser Angkur Baja

Sesuai dengan pasal I8.2 SNI 1729:2015 menyatakan bahwa panjang dari angkur *steel headed stud* tidak boleh lebih kecil dari empat kali diameter batang dari dasar angkur *steel headed stud* pada bagian atas dari kepala batang sesudah pemasangan.

Kekuatan geser nominal satu angkur *steel headed stud* yang ditanam pada suatu pelat beton solid atau pada suatu pelat komposit dengan dek harus ditentukan sebagai berikut:

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sa} \cdot \sqrt{f_c' \cdot E_c} \leq R_g \cdot R_p \cdot A_{sa} \cdot F_u \dots\dots\dots (2.38)$$

keterangan:

$$A_{sa} = \text{luas penampang dari angkur } \textit{steel headed stud} \text{ (mm}^2\text{)}$$

E_c = modulus elastisitas beton

F_u = kekuatan tarik minimum yang diisyaratkan dari suatu angkur *steel headed stud* (Mpa)

Tabel 2.16 Nilai R_g dan R_p

Kondisi	R_g	R_p
Tanpa dek	1,0	1,0
Dek diorientasi paralel profil baja		
$\frac{W_r}{h_r} \geq 1,5$	1,0	0,75
$\frac{W_r}{h_r} \leq 1,5$	0,85**	0,75
Dek diorientasikan tegak lurus terhadap profil baja		
Jumlah dari angkur <i>steel headed stud</i> yang memiliki rusuk dek yang sama		
1	1,0	0,6 ⁺
2	0,85	0,6 ⁺
3 atau lebih	0,7	0,6 ⁺

h_r = tinggi rusuk nominal, in. (mm)

W_r = lebar rata-rata dari rusuk atau voute beton (seperti dijelaskan dalam Pasal I3.2c), in. (mm)

** untuk suatu angkur *steel headed stud* tunggal

⁺ nilai ini dapat ditingkatkan sampai -,75 bila $e_{mid-hr} \geq 2$ in. (51 mm)

Sumber: SNI 1729:2015

Kekuatan geser nominal satu angkur kanal canai panas yang ditanam pada pelat beton solid harus ditentukan sebagai berikut:

$$Q_n = 0,3 \cdot (tf + 0,5tw) \cdot la \cdot \sqrt{f'c' \cdot E_c} \dots\dots\dots (2.39)$$

keterangan:

la = panjang angkur kanal (mm)

tf = ketebalan sayap angkur kanal (mm)

tw = ketebalan badan angkur kanal (mm)

Kekuatan dari angkur kanal harus dikembangkan dengan pengelasan kanal ke sayap balok untuk suatu gaya yang sama dengan Q_n , dengan memperhitungkan eksentrisitas pada konektor. Jumlah angkur baja yang diperlukan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$N = \frac{V}{Q_n} \dots\dots\dots (2.40)$$

keterangan:

N = jumlah angkur konektor yang dibutuhkan

V = gaya geser horizontal

Q_n = kuat geser nominal satu buah angkur konektor

2.3.4 Dasar Perencanaan Batang Tarik

Material baja mempunyai kemampuan sama dalam memikul gaya tarik atau gaya tekan. Mutu bahannya juga relatif tinggi, sehingga dimensi struktur cenderung langsing. Untuk struktur seperti itu, pemakaian material baja hanya efisien untuk batang tarik. Pada batang tekan kapasitasnya ditentukan oleh tekuk (*buckling*), suatu permasalahan stabilitas yang dipengaruhi konfigurasi geometri (struktur dan penampang), dan tidak hanya materialnya saja.

2.3.4.1 Batas Kelangsingan

Karena mutu material baja relatif tinggi, dimensi batang tariknya bisa sangat langsing. Secara teoritis, kondisi kelangsingan hanya diperhitungkan untuk elemen tekan, untuk mengantisipasi tekuk. Batang tarik secara teoritis tidak mengalami tekuk, oleh karena itu batang tarik tidak dibatasi kelangsingannya, hanya disarankan $L/r \leq 300$. Saran didasarkan pengalaman praktis segi ekonomis, kemudahan pembuatan, dan resiko rusak yang kecil selama konstruksi. Selain itu, elemen yang sangat langsing biasanya cenderung bergoyang atau bergetar, dan itu membuat tidak nyaman bagi penghuninya. Saran tidak berlaku jika batang tariknya merupakan struktur penggantung (*hanger*) atau jika memakai penampang pejal (*rod*).

2.3.4.2 Kuat Tarik Nominal

Kuat tarik rencana $\phi_t P_n$, dengan ϕ_t sebagai faktor ketahanan tarik dan P_n sebagai kuat aksi nominal, adalah nilai terkecil dari dua tinjauan batas keruntuhan yang terjadi pada penampang utuh dan penampang berlubang (tempat sambungan). Kuat tarik penampang utuh terhadap keruntuhan leleh (*yield*):

$$P_n = F_y \cdot A_g \dots \dots \dots (2.41)$$

dimana:

ϕ_t = 0,9 terhadap keruntuhan leleh

A_g = luas penampang bruto (gross)

Kuat tarik penampang berlubang (ditempat sambungan) akan memanfaatkan perilaku *strain-hardening* (peningkatan tegangan) pada kondisi regangan inelastis yang dipicu oleh lonjakan tegangan terkonsentrasi di sekitar lubang.

$$P_n = F_u \cdot A_e = F_u \cdot A_n \cdot U \dots \dots \dots (2.42)$$

dimana:

ϕ_t = 0,75 terhadap keruntuhan fraktur

A_n = luas penampang bersih (netto)

A_e = luas penampang efektif

U = faktor *shear lag*

Nilai F_y dan F_u tergantung dari mutu material, yaitu kuat leleh dan kuat tarik minimum (kuat batas) dari bahannya. Keruntuhan leleh (*yield*) tingkat daktilitasnya lebih tinggi dari keruntuhan fraktur, oleh sebab itu maka faktor ketahanan tarik (ϕ_t) antara keduanya berbeda. Faktor keamanan untuk fraktur tentunya lebih tinggi.

2.3.5 Dasar Perencanaan Batang Tekan

Batang tekan ditujukan untuk komponen struktur yang memikul beban tekan sentris tepat pada titik berat penampang, atau kolom dengan gaya aksial saja. Namun pada umumnya, terdapat eksentrisitas oleh ketidaklurusan batang, atau oleh ketidaktepatan pembebanan, juga kekangan dari tumpuannya yang menimbulkan momen.

2.3.5.1 Tekuk Parameter Penting Batang Tekan

Parameter material, F_y dan F_u akan menentukan kuat batang tarik, tetapi pada batang tekan hanya F_y yang penting, F_u tidak pernah tercapai. Selain material, maka batang tekan juga dipengaruhi oleh parameter lain, yaitu konfigurasi bentuk fisik atau geometri.

Parameter geometri terdiri dari luas penampang (A), pengaruh bentuk penampang terhadap kekakuan lentur (I_{min}), panjang batang dan kondisi pertambahan atau tumpuan, yang diwakili oleh panjang efektif (KL). Ketiganya dapat diringkas lagi menjadi satu parameter tunggal, yaitu rasio kelangsingan

batang (KL/r_{min}), dimana $r_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$ adalah radius girasi pada arah tekuk. Secara visual, tekuk dapat dibedakan menjadi dua, yaitu (1) tekuk lokal pada elemen penampang, dan (2) tekuk global pada kolom atau batang secara menyeluruh.

2.3.5.2 Klasifikasi Penampang dan Tekuk Lokal

Penyelesaian masalah tekuk lokal lebih kompleks dibanding tekuk global. Jika terjadi tekuk lokal, selain penyelesaiannya tidak sederhana, maka pemakaian penampangnya akan tidak efisien karena terjadi pada kondisi beban elastis (belum leleh).

Agar strukturnya optimal, maka resiko tekuk lokal harus dihindari. Untuk itu dibuat klasifikasi untuk memisahkan penampang tidak langsing dan langsing. Itu dilakukan dengan cara mengevaluasi rasio lebar-tebal (b/t) tiap-tiap elemen dari penampang. Elemen-elemen dipilih berdasarkan kondisi kekangannya, apakah kedua sisinya tersambung kepada elemen lain atau masih ada sisi bebas. Nilai b/t setiap elemen profil penampang selanjutnya dibandingkan dengan nilai batas rasio b/t . Jika semua elemen tidak melebihi nilai batas rasio b/t , maka penampang diklasifikasikan sebagai penampang tidak langsing (ideal) dan sebaliknya sebagai penampang langsing.

2.3.5.3 Panjang Efektif Kolom

Panjang efektif kolom atau KL adalah cara sederhana tetapi efektif dalam memprediksi kekuatan kolom, yaitu dengan mencari korelasi bentuk tekuk yang berkesesuaian dengan rumus Euler ($P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$). Kondisi ideal tumpuan tidak mudah dievaluasi di lapangan, untuk itu rekomendasinya nilai K diperbesar. Meskipun akurat, tetapi implementasi tidak mudah, diperlukan proses penyederhanaan dari struktur real yang kompleks terlebih dahulu. Dalam hal ini cukup diklasifikasikan menjadi dua kategori dengan nilai K yang berbeda, yaitu:

- a. Rangka tidak bergoyang : $0,5 \leq K \leq 1,0$
- b. Rangka bergoyang : $1,0 \leq K \leq \infty$

Garis terputus menunjukkan diagram kolom tertekuk	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Nilai K yang dianjurkan untuk kolom yang mendekati kondisi ideal	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Kode ujung						

Gambar 2.8 Nilai K untuk kolom dengan ujung-ujung yang ideal (sumber: gambar 7.6-1 SNI 1729:2002)

2.3.5.4 Kuat Tekan Nominal

Tekuk global ditentukan oleh kelangsingan elemen penampang dan bentuknya. Ada tiga perilaku tekuk, yaitu (1) tekuk lentur; (2) tekuk torsi dan (3) tekuk lentur-torsi. Adapun tekuk global atau lokal tergantung klasifikasi penampang, jika penampangnya tidak-langsing maka tidak terjadi tekuk lokal, dan sebaliknya penampang langsing berisiko tekuk lokal terlebih dahulu. Karena tekuk terjadi pada kondisi elastis, sebelum leleh maka agar efisien perlu dipilih kolom penampang tidak langsing.

a. Tekuk Lentur

Tekuk lentur yang dimaksud adalah fenomena tekuk global pada penampang dengan klasifikasi elemen tidak langsing. Beban kritis yang menyebabkan tekuk tersebut telah dirumuskan oleh Euler. Sampai saat ini rumus tersebut tetap dijadikan dasar menentukan kuat nominal batang tekan (P_n). Agar berkesesuaian dengan cara perencanaan batang tarik, maka luas penampang utuh atau gross (A_g) dijadikan konstanta tetap, adapun variabelnya adalah tegangan kritis (F_{cr}), yang dituliskan dalam format berikut.

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \dots \dots \dots (2.43)$$

Tegangan kritis, F_{cr} dihitung berdasarkan syarat berikut, jika:

1. $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{F_e} \leq 2,25$, tekuk inelastis, maka:

$$F_{cr} = \left(0,658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) \cdot F_y \dots\dots\dots(2.44)$$

2. $\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{F_e} > 2,25$, tekuk elastis, maka:

$$F_{cr} = 0,877 \cdot F_e \dots\dots\dots(2.45)$$

dimana F_e = tegangan tekuk Euler (elastis), yaitu:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \dots\dots\dots(2.46)$$

b. Tekuk Torsi dan Tekuk Lentur Torsi

Fenomena tekuk, selain lentur ada lagi yaitu puntir (tekuk torsi), atau gabungan keduanya yaitu tekuk lentur-torsi. Biasa terjadi pada penampang dengan kekakuan torsi yang relatif kecil, atau pusat geser dan pusat beratnya tidak berhimpit. Kapasitas tekan nominal penampang kolom tidak-langsing terhadap tekuk torsi dan lentur-torsi adalah sebagai berikut.

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \dots\dots\dots(2.47)$$

Tegangan Kritis, F_{cr} dihitung berdasarkan syarat berikut, jika:

1. Penampang siku ganda atau tee

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H}\right) \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{cry} \cdot F_{crz} \cdot H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}}\right] \dots\dots\dots(2.48)$$

2. Untuk penampang yang lain, F_{cr} tetap dengan rumus tekuk lentur, tetapi tegangan tekuk elastis F_e dihitung dengan memasukkan pengaruh kekakuan torsi batangnya sebagai berikut:

- a. Profil dengan sumbu simetri tunggal, maka:

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H}\right) \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 F_{ey} \cdot F_{ez} \cdot H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}}\right] \dots\dots\dots(2.49)$$

- b. Profil dengan sumbu simetri ganda, maka:

$$F_e = \left(\frac{\pi^2 EC_w}{(K_2 L)^2} + GJ\right) + \frac{1}{I_x + I_y} \dots\dots\dots(2.50)$$

2.3.6 Dasar Perencanaan Batang Portal (Balok-Kolom)

Batang baja terhadap gaya aksial saja (tarik atau tekan) hanya cocok untuk perencanaan struktur rangka batang (*truss*) dibebani pada titik buhul, dan berat sendirinya relatif kecil dibanding beban yang dipikul. Sedangkan batang baja

dengan momen lentur hanya cocok untuk struktur balok, yang besar momen lenturnya lebih dominan dibanding gaya geser yang terjadi. Struktur yang elemen batangnya menerima kombinasi gaya aksial dan momen sekaligus harus direncanakan dengan perhitungan batang portal (balok-kolom). Pada dasarnya perencanaan batang portal ditinjau terhadap kuat tekan dan juga kuat lenturnya. Dari tinjauan kuat tekan akibat gaya aksial dan kuat lentur akibat gaya lentur nantinya dihubungkan dengan persamaan interaksi antara kuat tekan dan kuat lentur sebagai berikut:

a. Jika $\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2$, maka: $\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$ (2.51)

b. Jika $\frac{P_r}{P_c} \leq 0,2$, maka: $\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$ (2.52)

2.3.7 Dasar Perencanaan Sambungan Struktur

Pemilihan jenis dan detail sambungan adalah ciri utama perencanaan konstruksi baja, yang jumlahnya sendiri relatif banyak dan bervariasi. Sistem sambungan untuk struktur baja relatif istimewa jika dibanding struktur beton. Umumnya pada struktur beton tidak mengenal istilah sambungan, maklum umumnya cor ditempat. Komponen struktur baja berbeda, tidak bisa dibuat sekaligus, tetapi dalam bentuk elemen-elemen lepas untuk dirakit dengan sambungan di lapangan. Oleh sebab itu sistem sambungan yang dipilih akan mempengaruhi kekuatan, biaya, cara, dan waktu pelaksanaannya sendiri.

Dari berbagai konfigurasi sambungan, juga orientasi pembebanan yang bekerja, maka gaya internal yang terjadi pada alat sambung baut hanya berupa gaya tarik dan gaya geser, atau gabungan keduanya. Berdasarkan hal itu, maka sambungan itu sendiri dapat dikelompokkan menjadi sambungan tipe geser dan sambungan tipe tarik atau gabungan dari keduanya.

2.3.7.1 Sambungan Baut Tipe Geser

Konfigurasi sambungan baut tipe geser dan cara pemasangan baut mutu tinggi, ternyata saling terkait dan mempengaruhi kekuatan dan kekakuan sambungan itu sendiri. Keterkaitannya menghasilkan dua mekanisme pengalihan gaya-gaya yang berbeda, yaitu mekanisme slip-kritis dan tumpu. Sambungan baut dengan mekanisme slip-kritis atau tumpu, tidak bisa dibedakan dari tampilan

fisiknya saja. Mekanisme tersebut hanya akan terlihat setelah diberikan pembebanan. Jika pada beban rencana, baut tidak mengalami slip (tetap ditempat), maka saat itu mekanisme slip-kritis sedang bekerja. Kekuatannya tergantung dari besarnya tahanan friksi yang terjadi. Sebaliknya, jika pada saat dibebani, baut mengalami slip, maka mekanisme tumpu telah bekerja.

Sambungan slip-kritis adalah sambungan yang direncanakan tidak mengalami slip. Sistem itu diperlukan untuk mengatasi terjadinya beban bolak-balik (misal tarik jadi desak atau sebaliknya), yang umumnya ada pada jembatan. Jika itu berlangsung terus-menerus, pada waktu lama maka struktur akan berisiko tinggi mengalami kerusakan fatig, yaitu keruntuhan pada kondisi tegangan elastis. Tentu saja tidak semua sambungan harus mempunyai ketahanan seperti itu. Bangunan gedung misalnya, sambungannya cukup direncanakan terhadap mekanisme tumpu saja, agar jumlah baut yang diperlukan lebih sedikit, yang berarti lebih ekonomis.

a. Mekanisme Slip Krisis Baut

Sambungan baut mutu tinggi tipe geser dengan mekanisme slip-kritis atau sambungan slip-kritis dipilih untuk konstruksi yang didominasi beban dinamik atau beban bolak-balik berganti tanda, yang umum terjadi pada jembatan atau mesin industri.

Tahanan slip-kritis nominal (R_n) untuk baut mutu tinggi adalah sebagai berikut:

$$R_n = \mu \cdot D_u \cdot h_f \cdot T_b \cdot n_s \dots\dots\dots (2.53)$$

keterangan:

μ = koefisien slip rata-rata, tergantung kondisi permukaan. Pekerjaan persiapan mutu kelas-A adalah $\mu=0,3$ dan untuk mutu kelas-B (lebih ketat) adalah $\mu=0,5$

D_u = 1,13 , adalah faktor pengali yang mempresentasikan gaya prategang baut rata-rata terpasang dengan gaya tarik baut prategang minimum

h_f = faktor terkait adanya pelat pengisi (filler), jika tidak ada filler atau hanya 1 filler maka $h_f = 1$, jika ada 2 filler diantara pelat sambung maka $h_f = 0,85$

T_b = gaya tarik baut prategang minimum

n_s = jumlah permukaan yang menimbulkan bidang kontak

Kuat batas slip-kritis, $R_u = \phi R_n$, dimana nilai ϕ tergantung bentuk dan ukuran lubang bautnya. Jika lubang standar atau lubang slot pendek yang dipasang tegak lurus arah beban, $\phi = 1,0$. Untuk lubang *oversize* dan slot pendek tetapi dipasang sejajar arah beban maka $\phi = 0,85$. Jika lubangnya adalah slot-panjang maka $\phi = 0,70$.

b. Mekanisme Tumpu Baut

Mekanisme tumpu hanya terjadi jika mekanisme slip-kritis gagal, ditandai dengan terjadinya slip. Istilah gagal, tidak berarti bahwa kondisinya telah runtuh, tetapi karena tahanan friksiya tidak lagi bekerja. Adapun sambungan tipe geser bermekanisme tumpu adalah didasarkan pada kondisi bagaimana memanfaatkan material secara maksimal, yaitu sampai kondisi inelastis (F_y dan F_u). Mekanisme ini menghasilkan kapasitas yang lebih besar, sehingga jumlah baut perlu relatif lebih sedikit dibanding jika memakai mekanisme slip-kritis.

1. Kuat tumpu baut

Kuat tumpu pelat sambungan memperhitungkan pengaruh deformasi. Jika besarnya itu akan mempengaruhi fungsi struktur sehingga kekuatannya perlu dibatasi maka dapat dipakai rumusan berikut dengan mengambil nilai yang terkecil.

$$R_n = 1,2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2,4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots\dots\dots (2.54)$$

Selanjutnya jika terjadi deformasi pada sambungan dianggap tidak mempengaruhi fungsi maka kuat tumpu dapat ditingkatkan yaitu nilai terkecil persamaan berikut:

$$R_n = 1,5 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 3,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots\dots\dots (2.55)$$

dimana:

l_c = jarak bersih (mm) searah gaya, dihitung dari tepi lubang ke tepi pelat
terluar (untuk baut pinggir) atau jarak bersih antar tepi lubang (untuk
baut dalam)

F_u = kuat tarik minimum baja pelat yang ditinjau (MPa)

Untuk kuat tumpu dengan lubang baut tipe slot panjang yang arah slotnya tegak lurus arah gaya, maka kekuatannya berkurang dan dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_n = 1,0 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots\dots\dots (2.56)$$

2. Kuat geser baut

Jika pelat mengalami fenomena tumpu dan geser, maka pada baut juga demikian. Tetapi karena ukuran baut sudah tertentu, maka kerusakan akan terjadi lebih dahulu adalah geser. Oleh sebab itu dalam perencanaan yang dievaluasi hanya kuat geser saja, yang relatif lebih lemah dibanding kuat tumpuannya. Rumus kuat geser baut per 1 bidang geser adalah sebagai berikut:

$$R_n = F_{nv} \cdot A_b \dots \dots \dots (2.57)$$

dimana:

F_{nv} = tegangan geser nominal baut

A_b = luas penampang baut, bagian berulir atau polos, tergantung tegangan geser nominal yang dipakai

c. Kuat Blok Plat

Perhitungan kekuatan sambungan tipe geser dengan mekanisme tumpu didasarkan pada sambungan kekuatan individu masing-masing baut sambungan dengan jumlah baut yang relatif kecil. Tetapi untuk sambungan dengan jumlah baut yang relatif banyak, dengan penempatan yang berkelompok, dapat menyebabkan keruntuhan blok dalam satu kesatuan. Rumus kuat blok geser pelat adalah sebagai berikut:

$$R_n = 0,6 F_u \cdot A_{nv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \leq 0,6 F_y \cdot A_{gv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \dots \dots \dots (2.58)$$

dimana:

F_u = kuat tarik minimum pelat sambungan (Mpa)

F_y = kuat leleh minimum pelat sambungan (Mpa)

A_{nv} = luas netto potongan yang mengalami gaya geser, garis batas blok searah gaya (mm^2)

A_{gv} = luas gross potongan yang mengalami gaya geser, garis batas blok searah gaya (mm^2)

A_{nt} = luas netto potongan yang mengalami gaya geser, garis batas blok tegak lurus gaya (mm^2)

U_{bs} = untuk tegangan tarik merata (uniform) $U_{bs} = 1,0$, dan yang tidak merata (gradien) $U_{bs} = 0,5$. Ini biasa dijumpai misalnya pada sambungan ujung dari balok dengan penempatan kolom baut secara ganda

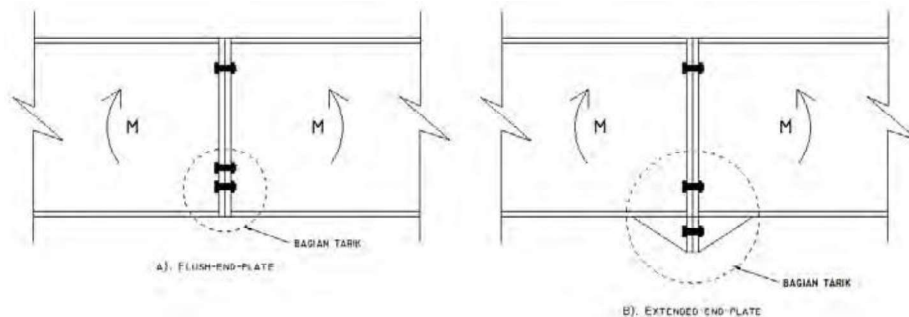
d. Kekuatan Sambungan

Untuk mendapatkan kuat nominal sambungan, semua mekanisme keruntuhan yang teridentifikasi harus ditinjau, yaitu : (1) kuat tumpu (geser) pelat, yang merupakan jumlah kumulatif tahanan tumpu masing-masing baut yang mengalami kontak dengan pelat; (2) kuat geser baut, tergantung dari jumlah bidang geser per baut, jumlah baut di sambungan dan kuat geser nominal baut; (3) kuat geser blok, khusus untuk sambungan dengan jumlah baut yang relatif banyak dan ditempatkan secara berkelompok.

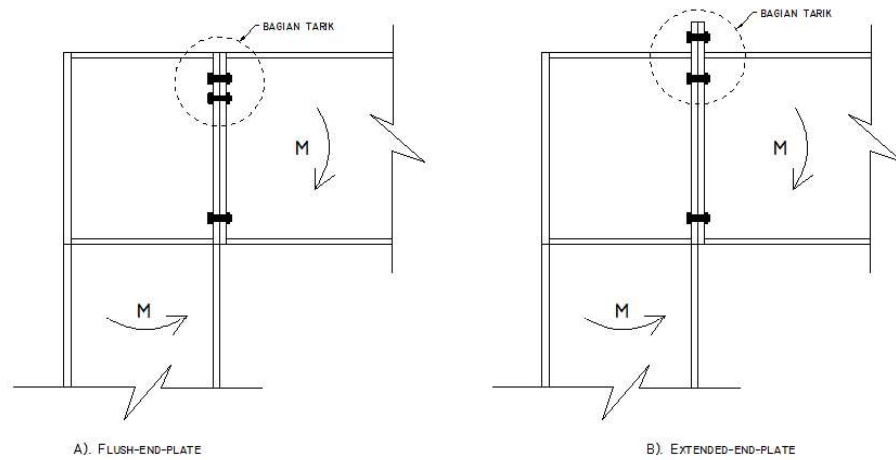
Kuat nominal maksimum, R_n , dari sambungan ditentukan jika salah satu dari mekanisme diatas dapat tercapai terlebih dahulu. Itu artinya gaya terkecil yang menimbulkan mekanisme keruntuhan adalah yang menentukan. Selanjutnya kuat batas sambungannya adalah $R_u = \phi R_n$, dengan nilai faktor tahanan $\phi = 0,75$ untuk keseluruhan mekanisme keruntuhan yang ditinjau. Hal itu menandakan bahwa keruntuhan yang terjadi melibatkan keruntuhan fraktur yang relatif kurang daktil dibanding keruntuhan leleh.

2.3.7.2 Sambungan *End Plate*

Sambungan baut tipe tarik memiliki jumlah baut yang relatif sedikit, dan ada tambahan pelat khusus dilas pada ujungnya sehingga sering disebut sebagai sambungan *end-plate*. Jika komponen sambungan terpasang saling menempel rapat dengan lawan sambungannya, maka aplikasi sambungan *end-plate* dapat dipasang untuk balok-balok atau portal (kolom-balok) adalah yang bisa berupa *end-plate* juga atau pelat sayap profil kolom.



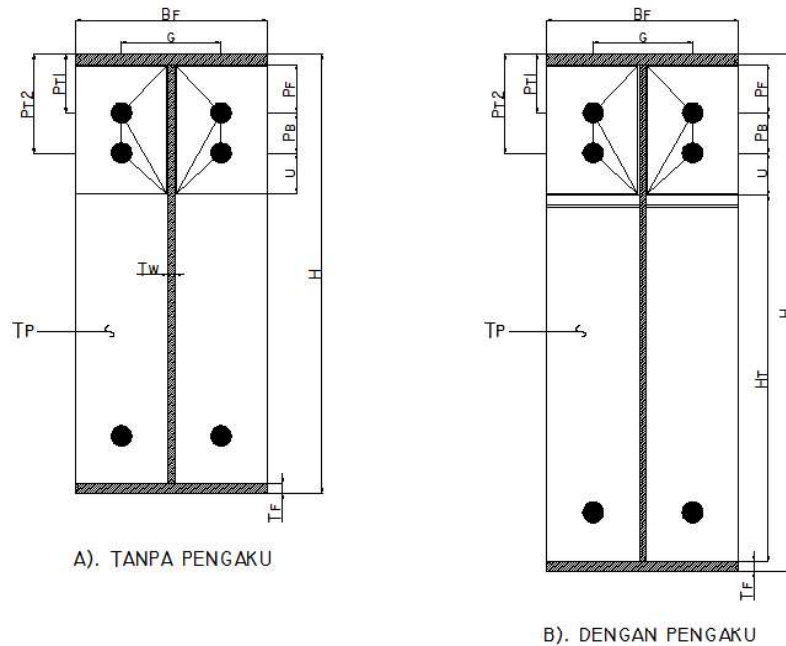
Gambar 2.9 Sambungan *end-plate* pada balok



Gambar 2.10 Sambungan *end-plate* pada portal

a. Kapasitas Pelat Ujung

Kinerja sambungan *end-plate* tergantung kekuatan pelat ujungnya dan baut tarik. Teori garis leleh (*yield line theory*) adalah cara yang terbukti paling akurat untuk menghitung secara maksimal kekuatan pelat ujung.



Gambar 2.11 Pola garis leleh pelat tipe *flush-end-plate*

1. *Flush-end-plate* polos

Kuat sambungan *end-plate* terhadap kondisi batas terjadinya leleh pelat ujung yang dicari berdasarkan teori garis leleh yaitu:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{h-p_t}{p_f} + \frac{h-p_{t2}}{u} \right) + 2(p_f + p_b + u) \left(\frac{h-p_t}{p_f} \right) \right] \dots\dots\dots (2.59)$$

Jika $M_u = \phi M_{pl}$ maka tebal pelat minimum dapat dicari:

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{b_f g \left(\frac{h-p_{t2}}{h-p_t} \right)} \dots\dots\dots (2.60)$$

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\frac{b_f}{2} \left(\frac{h-p_t}{p_f} + \frac{h-p_{t2}}{u} \right) + 2(p_f + p_b + u) \left(\frac{h-p_t}{p_f} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.61)$$

2. *Flush-end-plate* dengan pengaku

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas terjadinya leleh pelat ujung yang dicari berdasarkan teori garis leleh yaitu:

$$AA = (h - p_t) \left[\frac{b_f}{2p_f} + \frac{2}{g} (p_f + p_b) \right] \dots\dots\dots (2.62)$$

$$BB = 1,25 (h - p_{t2}) \left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_s} + \frac{1}{2h_t} \right) + \frac{g}{10p_s} + \frac{2}{g} + \left(\frac{p_b}{5} + p_s \right) \right] \dots\dots\dots (2.63)$$

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left\{ AA + \frac{1}{4} b_f + BB \right\} \dots\dots\dots (2.64)$$

Jika $M_u \leq \phi M_{pl}$ maka tebal pelat perlu dapat dicari dengan cara, berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{AA + \frac{1}{4} b_f + BB} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.65)$$

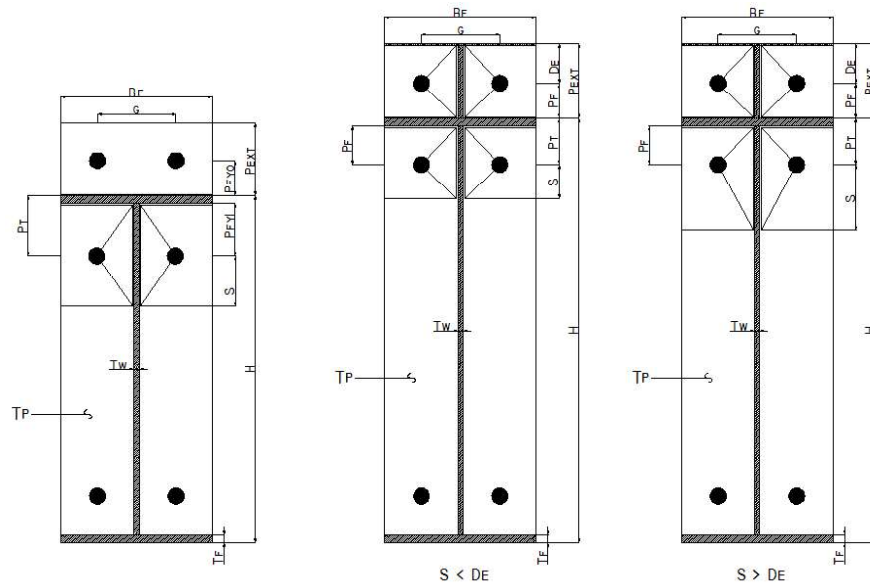
dimana:

F_{py} = tegangan leleh material pelat ujung

M_{pl} = kapasitas momen plastis pelat ujung

M_u = momen batas sambungan *end-plate*

ϕ = ketuntuhan lentur akibat leleh = 0,90



Gambar 2.12 Pola keruntuhan berdasarkan garis leleh pelat tipe *extended-end-plate*

3. *Extended-end-plate* polos

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas leleh pelat berdasarkan teori garis leleh yaitu:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\left(\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_{f,i}} + \frac{1}{s} \right) + (p_{f,i} + s) \frac{2}{g} \right) (h - p_t) + \frac{b_f}{2} \left(\frac{h}{p_{f,o}} + \frac{1}{2} \right) \right] \dots (2.66)$$

Jika $s = \frac{1}{2} (b_f \cdot g)^{\frac{1}{2}}$ dan $M_u \leq \phi M_{pl}$ maka tebal pelat perlu berdasarkan kuat batas leleh dapat dicari sebagai berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left(\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_{f,i}} + \frac{1}{s} \right) + (p_{f,i} + s) \frac{2}{g} \right) (h - p_t) + \frac{b_f}{2} \left(\frac{h}{p_{f,o}} + \frac{1}{2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \dots (2.67)$$

4. *Extended-end-plate* dengan pengaku

a. $s < d_e$

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas leleh pelat berdasarkan teori garis leleh yaitu:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{s} \right) + (p_f + s) \frac{2}{g} \right] [(h - p_t) + (h + p_t)] \dots (2.68)$$

Jika $s = \frac{1}{2} (b_f \cdot g)^{\frac{1}{2}}$ dan $M_u \leq \phi M_{pl}$ maka tebal pelat perlu berdasarkan kuat batas leleh dapat dicari sebagai berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{s} \right) + (p_f + s) \frac{2}{g} \right] [(h - p_t) + (h + p_t)]} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.69)$$

b. $s > d_e$

Kuat sambungan end-plate terhadap kondisi batas leleh pelat berdasarkan teori garis leleh yaitu:

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{2s} \right) + (p_f + d_e) \frac{2}{g} \right] [(h - p_t) + (h + p_f)] \dots\dots\dots (2.70)$$

Jika $s = \frac{1}{2} (b_f \cdot g)^{\frac{1}{2}}$ dan $M_u \leq \phi M_{pl}$ maka tebal pelat perlu berdasarkan kuat batas leleh dapat dicari sebagai berikut:

$$t_p \geq \left[\frac{\frac{M_u}{\phi F_{py}}}{\left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{2s} \right) + (p_f + d_e) \frac{2}{g} \right] [(h - p_t) + (h + p_f)]} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.71)$$

dimana:

F_{py} = tegangan leleh material pelat ujung

M_{pl} = kapasitas momen plastis pelat ujung

M_u = momen batas sambungan *end-plate*

ϕ = ketuntuhan lentur akibat leleh = 0,90

2.3.7.3 Kapasitas Baut

Sambungan *end-plate* ditentukan oleh kuat pelat ujung dan kuat baut tariknya. Gaya tarik pada baut dipengaruhi oleh kinerja pelat ujung. Jika pelat ujungnya mengalami deformasi, terjadi efek *prying*, yaitu adanya penambahan gaya tarik dibaut. Jika deformasinya relatif kecil dan dapat diabaikan, efek *prying* juga relatif kecil. Kuat sambungan didasarkan pada baut tanpa efek *prying*.

$$M_{np} = 2p_t (d_1 + d_2) \dots\dots\dots (2.72)$$

$$M_u = \phi M_{np} \dots\dots\dots (2.73)$$

dimana:

M_{np} = kapasitas sambungan *end-plate* didasarkan pada kekuatan baut tanpa efek *prying*

p_t = kuat tarik baut, $p_t = A_b \cdot F_{nt}$

ϕ = ketuntuhan fraktur baut = 0,75

2.3.7.4 Sambungan *Base Plate*

Struktur baja umumnya untuk bangunan di bagian atas, di bagian bawah khususnya pondasi mengandalkan struktur beton. Untuk menghubungkan keduanya perlu sambungan, yaitu *base-plate*. Pada prinsipnya pelat landasan (*base-plate*) dibuat untuk transfer gaya atau momen dari struktur baja yang relatif lebih kuat ke struktur beton yang lebih lemah tanpa mengakibatkan kerusakan karena beban telah terbagi merata ke *base plate*.

Base plate yang umum digunakan terdiri dari pelat landasan dan baut angkur. Adapun pelat landasan tersambung ke kolom baja dengan las. Secara teoritis, bisa saja baut angkur tidak diperlukan, tetapi dalam pelaksanaan harus dipasang. Minimal dua buah, untuk mengantisipasi momen tak terduga yang mungkin terjadi selama masa konstruksi.

a. Kuat Tumpu Beton

Kuat tumpu rencana adalah $\phi_c P_p$, dengan nilai $\phi = 0,65$. Adapun kuat tumpu nominal P_p tergantung dari luasan beton tumpuan yang tersedia, sebagai berikut:

1. Luas beton \cong luas pelat landasan, maka:

$$P_p = 0,85 \cdot f_c' \cdot A_1 \dots \dots \dots (2.74)$$

atau dalam format tegangan tumpu nominal, maka:

$$f_{p(maks)} = \phi_c \cdot 0,85 \cdot f_c' \dots \dots \dots (2.75)$$

2. Luas beton tumpuan $>$ luas pelat landasan yang besarnya merata pada semua sisi. Untuk itu kuat tumpu beton dapat ditingkatkan maksimum sampai dua kalinya:

$$P_p = 0,85 \cdot f_c' \cdot A_1 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \cdot f_c' \cdot A_1 \dots \dots \dots (2.76)$$

$$f_{p(maks)} = \phi_c \cdot 0,85 \cdot f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \cdot f_c' \dots \dots \dots (2.77)$$

dimana:

f_c' = kuat tekan beton yang diisyaratkan, Mpa

A_1 = luas beton yang dibebani gaya konsentris, mm²

A_2 = luas bawah piramida terpancung yang luas atas adalah A_1 , dimana sisi miringnya memiliki perbandingan rasio horizontal : vertikal adalah 2 : 1, mm^2

Apabila luas beton tumpuan \gg luas *base plate* secara merata, maka bagian beton tumpuan yang lebih besar dapat berfungsi sebagai struktur pengekang untuk bagian beton yang terbebani. Ini adalah salah satu cara agar kuat tumpunya bisa ditingkatkan lagi.

b. Tekan Konsentris

Jika base-plate bertumpu pada permukaan beton pondasi, maka dimensi pelat landasan ($B \times N$) harus dipilih agar beton dibawahnya tidak rusak, dengan memenuhi ketentuan berikut:

$$f_p = \frac{p_u}{B.N} \leq f_{p(maks)} \dots\dots\dots (2.78)$$

Kuat perlu pada pelat landasan dapat ditentukan berikut:

$$M_{pl} = \frac{1}{2} f_p l^2 \dots\dots\dots (2.79)$$

dimana l adalah nilai terbesar dari m , n , dan $\lambda n'$.

$$m = \frac{N - 0,95d}{2} \dots\dots\dots (2.80)$$

$$n = \frac{B - 0,8b_f}{2} \dots\dots\dots (2.81)$$

$$\lambda n' = \frac{1}{4} \lambda \sqrt{db_f} \dots\dots\dots (2.82)$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{x}}{1 + \sqrt{1-x}} \leq 1 \dots\dots\dots (2.83)$$

$$x = \left\{ \frac{4db_f}{(d+b_f)^2} \right\} \frac{p_u}{\phi_c p_p} \dots\dots\dots (2.84)$$

cukup konservatif jika diambil $\lambda = 1$

untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan adalah:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi F_y}} = 1 \sqrt{\frac{2f_p}{\phi F_y}} = 1 \sqrt{\frac{2p_u}{\phi F_y B N}} \dots\dots\dots (2.85)$$

dimana:

ϕ = faktor ketahanan terhadap lentur = 0,90

l = nilai maksimum dari m , n , dan $\lambda n'$, agar tebal pelat landasannya ekonomis maka parameter tersebut dibuat minimum, salah satunya adalah menetapkan $m = n$

c. Tegangan Beton Segitiga-Elastis

1. Momen kecil tanpa angkur

Pendekatan tegangan tumpu beton pada kondisi elastis (segitiga) sengaja dipilih karena memberi gambaran cukup rasional tentang efek eksentrisitas (e) akibat gaya tekan P_u terhadap *base-plate*. Nilai e disebut sedang jika tidak perlu baut angkur untuk keseimbangannya. Maka nilai eksentrisitas (e) terbagi menjadi dua keadaan:

a. Kecil, jika $e = \frac{M_u}{P_u} \leq \frac{N}{6}$

b. Menengah, jika $\frac{N}{6} \leq e \leq \frac{N}{2}$

2. Momen besar dengan angkur

Bila eksentrisitas gaya P_u besar, maka *base-plate* dapat terguling. Untuk menghindarinya harus dipasang baut angkur untuk menahan gaya tarik sebesar T_u akibat momen guling tersebut.

Ukuran pelat landasan dipilih sedemikian sehingga tegangan tekan beton, f_p tidak melebihi tegangan tumpu nominal beton. Untuk mencari nilai T_u dan A , dipergunakan persamaan keseimbangan vertikal dan momen sebagai berikut:

$$T_u + P_u = \frac{1}{2} f_p AB \dots\dots\dots (2.86)$$

$$P_u \left(\frac{N}{2} - x \right) + M_u = \frac{1}{2} f_p AB \left(N - x - \frac{A}{3} \right) \dots\dots\dots (2.87)$$

jika $A' = \frac{N}{2} - x$ dan $f' = f_p B \frac{N-x}{2}$, dari persamaan diatas didapatkan:

$$A = \frac{f' \pm \sqrt{f'^2 - f_p B (P_u A' + M_u)}}{\frac{1}{2} f_p B} \dots\dots\dots (2.88)$$

nilai $A \leq N'$, jika tidak memenuhi maka ukuran pelat landas tidak mencukupi, perlu ukuran lain. Gaya tarik baut angkur adalah:

$$T_u = \frac{1}{2} f_p AB - P_u \dots\dots\dots (2.89)$$

d. Tegangan Beton Persegi – Ultimate

1. Momen kecil tanpa angkur

Perencanaan *base-plate* dengan beban eksentris bisa berdasarkan asumsi distribusi tegangan beton berbentuk segitiga atau kondisi tegangan elastis. Jika beban bertambah sampai kondisi batas, perilaku elastis terlewati dan masuk kondisi inelastis, yaitu beton pada kondisi batas (*ultimate*).

$$q_{maks} = f_{p(maks)} \cdot B \dots \dots \dots (2.90)$$

$$y_{min} = \frac{p_u}{q_{maks}} \dots \dots \dots (2.91)$$

jika ε jarak resultan tumpu beton terhadap pusat berat kolom:

$$\varepsilon_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{y_{min}}{2} = \frac{N}{2} - \frac{p_u}{2q_{maks}} \dots \dots \dots (2.92)$$

$$e_{kritis} = \varepsilon_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{p_u}{2q_{maks}} \dots \dots \dots (2.93)$$

eksentrisitas beban $\leq e_{kritis}$ maka baut angkur tidak diperlukan.

2. Momen besar dengan angkur

Jika eksentrisitas beban tekan $e = M_u + P_u > e_{kritis}$ maka baut angkur diperlukan untuk mencegah *base plate* mengalami puntir.

Untuk mencari nilai T_u dan Y , dipergunakan persamaan keseimbangan gaya vertikal sebagai berikut:

$$T_u + P_u = qY \dots \dots \dots (2.94)$$

Juga keseimbangan momen terhadap titik B:

$$q_{maks} Y \frac{N}{2} - \frac{Y}{2} + f - p_u(e + f) = 0 \dots \dots \dots (2.95)$$

Setelah pengaturan diperoleh persamaan kuadrat berikut:

$$Y^2 - 2 \left(\frac{N}{2} + f \right) Y + \frac{2p_u(e+f)}{q_{maks}} = 0 \dots \dots \dots (2.96)$$

dan penyelesaian untuk Y adalah:

$$Y = \left(\frac{N}{2} + f \right) \pm \sqrt{\left(\frac{N}{2} + f \right)^2 - \frac{2p_u(e+f)}{q_{maks}}} \dots \dots \dots (2.97)$$

Pada suatu kombinasi gaya, momen dan ukuran base plate tidak diperoleh penyelesaian, sehingga dimensi base plate perlu diperbesar. Agar persamaan bisa diselesaikan, maka:

$$\left(\frac{N}{2} + f \right)^2 \geq \frac{2p_u(e+f)}{q_{maks}} = 0 \dots \dots \dots (2.98)$$

Gaya pada angkur adalah:

$$T_u = qY - P_u \dots\dots\dots (2.99)$$

Untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan adalah

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi F_y}} \dots\dots\dots (2.100)$$

Pada kondisi desak: momen terjadi akibat tegangan reaksi beton pada kantilever m dari tumpuannya.

Jika $Y \geq m$, maka:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4\left(\frac{1}{2}f_p m^2\right)}{0,90 \cdot F_y}} = 1,5 \cdot m \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \dots\dots\dots (2.101)$$

Jika $Y < m$, maka:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4\left(f_p Y\left(m - \frac{Y}{2}\right)\right)}{0,90 \cdot F_y}} = 2,11 \sqrt{\frac{f_p Y\left(m - \frac{Y}{2}\right)}{F_y}} \dots\dots\dots (2.102)$$

dimana:

$$f_p = \frac{p_u}{BY} \dots\dots\dots (2.103)$$

Pada sisi tarik : momen terjadi akibat reaksi baut angkur yang bekerja seperti beban terpusat di pelat. Oleh sebab itu jumlah baut juga berpengaruh, khususnya terhadap lebar efektif pelat.

Tebal pelat landasan minimum untuk memikul baut angkur adalah:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4\left(\frac{T_u}{n_b} \cdot \frac{a}{2a}\right)}{0,90 \cdot F_y}} = 1,5 \sqrt{\frac{T_u}{n_b F_y}} \dots\dots\dots (2.104)$$

dimana:

n_b = jumlah baut angkur yang dipasang